

LABORATORIO EN EL ESPACIO LABORATORIO EN TIERRA

SPACE-LAB - EARTH-LAB

IGNACIO DA-RIVA

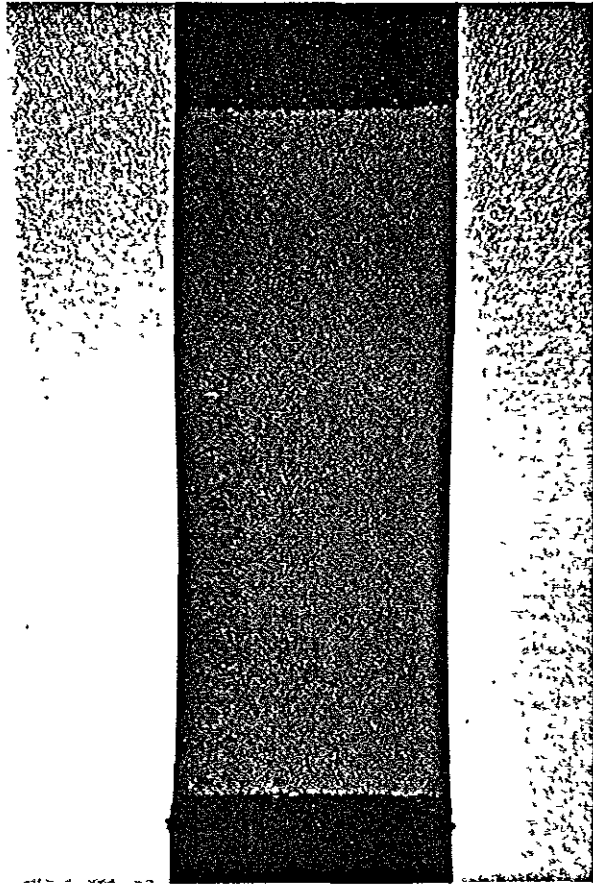
ESTE TRABAJO PRESENTA CIERTOS RESULTADOS RECIENTES QUE ESTAN RELACIONADOS CON EL EQUILIBRIO DINAMICO DE PUENTES LIQUIDOS MANTENIDOS ENTRE DISCOS SOLIDOS, PARALELOS Y COAXIALES. ESTOS ESTUDIOS TIENEN POR OBJETO ANALIZAR LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS A BORDO DEL SPACELAB EN DICIEMBRE DE 1983. SE HA DESARROLLADO UN PROGRAMA MUY ACTIVO EN TIERRA PARA SIMULAR, TANTO NUMERICA COMO EXPERIMENTALMENTE, LOS EFECTOS DE LA GRAVEDAD REDUCIDA EN CONFIGURACIONES CAPILARES. LA SIMULACION CON LA TECNICA DE PLATEAU PERMITE OBTENER EN MUCHOS CASOS RESULTADOS EXTREMADAMENTE PRECISOS, SIEMPRE QUE SE PONGA UN GRAN CUIDADO EN GOBERNAR LA DENSIDAD DEL LIQUIDO SOPORTE.

AUNQUE LAS APLICACIONES COMERCIALES DE ESTAS INVESTIGACIONES ESTAN LEJOS, SU CONTENIDO CIENTIFICO JUSTIFICA TRABAJAR MAS TODAVIA. EN EL CASO PARTICULAR QUE CONSIDERAMOS, EL PUENTE LIQUIDO ES LA CONFIGURACION MAS SENCILLA, VOLUMINOSA Y GOBERNABLE LIMITADA POR UNA SUPERFICIE LIBRE NO PLANA, Y ESTO ES EN SI MISMO CIENTIFICAMENTE INTERESANTE. LA COMPETENCIA COMERCIAL CON DESARROLLOS PARALELOS EN TIERRA SERA DESFAVORABLE PARA LOS PROCESOS ESPACIALES MIENTRAS NO AUMENTEN LAS OPORTUNIDADES DE VUELO.

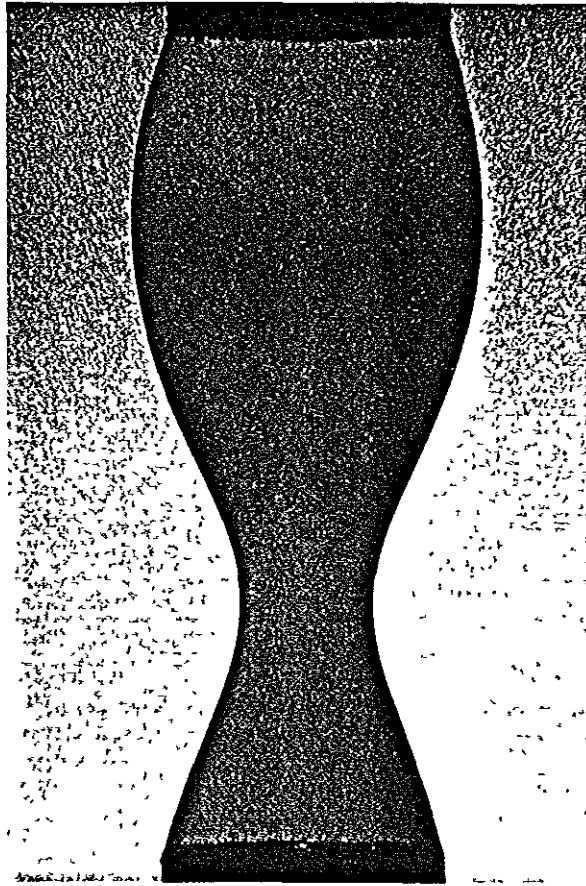
THIS PAPER DEALS WITH SOME RECENT RESULTS RELATED TO THE DYNAMIC EQUILIBRIUM OF LIQUID BRIDGES MAINTAINED BETWEEN SOLID, PARALLEL AND COAXIAL DISCS. THE AIM OF THESE STUDIES IS TO ANALYSE THE EXPERIMENTS CARRIED OUT ABOARD SPACELAB IN DECEMBER 1983.

A VERY ACTIVE PROGRAM ON EARTH HAS BEEN DEVELOPED TO SIMULATE, BOTH NUMERICALLY AND EXPERIMENTALLY, THE EFFECTS OF MICROGRAVITY ON CAPILLARY CONFIGURATIONS. SIMULATION BY MEANS OF PLATEAU'S TECHNIQUE ENABLES, IN MANY CASES, EXTREMELY PRECISE RESULTS TO BE OBTAINED ON CONDITION THAT GREAT CARE IS EXERCISED IN CONTROLLING THE DENSITY OF THE SUPPORTING LIQUID.

ALTHOUGH THERE ARE NOT AS YET ANY COMMERCIAL APPLICATIONS FOR THIS RESEARCH IN VIEW, FURTHER RESEARCH IS JUSTIFIED ON ACCOUNT OF ITS SCIENTIFIC CONTENT. IN THE PARTICULAR CASE UNDER CONSIDERATION, THE LIQUID BRIDGE IS THE SIMPLEST, MOST VOLUMINOUS AND MANAGEABLE CONFIGURATION LIMITED BY A NON-PLANE FREE SURFACE AND THIS IS, IN ITSELF, SCIENTIFICALLY INTERESTING. COMMERCIAL COMPETITION WITH PARALLEL DEVELOPMENTS ON EARTH WILL BE UNFAVOURABLE FOR PROCESSES CARRIED OUT IN SPACE SO LONG AS THERE IS NO INCREASE IN OPPORTUNITIES FOR FLIGHTS.



Puente líquido cilíndrico, no perturbado, en gravedad reducida, simulada con la técnica de Plateau.



Puente inicialmente cilíndrico a punto de romper por estirado.

El líquido del puente es RHODORSIL 47V20 teñido con anilina. RHODORSIL 47V20 es una silicona de Rhone-Poulenc que tiene una viscosidad cinemática de 20 cS. El líquido exterior es una mezcla de metanol y agua destilada. Diámetro de los discos: 30 mm.

Ahora que se ha realizado la primera misión del SpaceLab y que se están Analizando los resultados de los distintos experimentos llevados a cabo, ha llegado el momento de examinar la evolución del Espacio hacia un área de explotación y comercialización diarias. Aunque las primitivas esperanzas puestas en el Espacio, en cuanto a su valor práctico inmediato, parecen excesivamente optimistas, la investigación de procesos de manufactura en gravedad reducida es hoy en día una de las más fascinantes empresas científicas, tendente a aumentar nuestro dominio sobre muchos fenómenos extraños a nuestra experiencia diaria donde son enmascarados por la gravedad. Existe la esperanza de que puedan perfeccionarse procesos ya existentes y que estén siendo desveladas nuevas oportunidades de mejora.

Entre las características exclusivas del medio espacial, la más difícil de reproducir en el laboratorio terrestre es la gravedad reducida. Esta característica se obtiene en el Espacio equilibrando muy aproximadamente las fuerzas de volumen debidas a la gravedad terrestre con la fuerza debida a la aceleración centrífuga que actúa sobre el satélite.

En gravedad reducida casi desaparece la convección inducida por la flotabilidad, apenas existe sedimentación y se pueden mantener volúmenes

muy grandes de líquido mediante las fuerzas de tensión superficial. Estos efectos no son siempre beneficiosos, algunas veces son contradictorios entre sí: la transmisión de calor al fluido es menos eficaz, la degasificación de masas fundidas es más difícil y cuando las superficies de separación entre las fases son muy grandes, y en presencia de gradientes de tensión superficial, pueden aparecer corrientes de convección.

A la vista de lo anterior, es lógico que se preste una gran atención a los problemas de fusión sin crisoles contenedores. El presente trabajo no está relacionado con la fusión, más bien se refiere a las aplicaciones espaciales de una configuración muy bella, sencilla, accesible y gobernable, que ha sido estudiada durante al menos cien años: el llamado puente líquido (particularmente, puentes largos). El puente es una columna líquida soportada por tensión superficial entre dos discos circulares paralelos y, a menudo, coaxiales.

Aunque las posibles aplicaciones del puente líquido son numerosas, la más mencionada es la "zona flotante". Esta técnica está siendo usada en tierra para la preparación de monocristales muy puros de silicio y para la repurificación de metales en general.

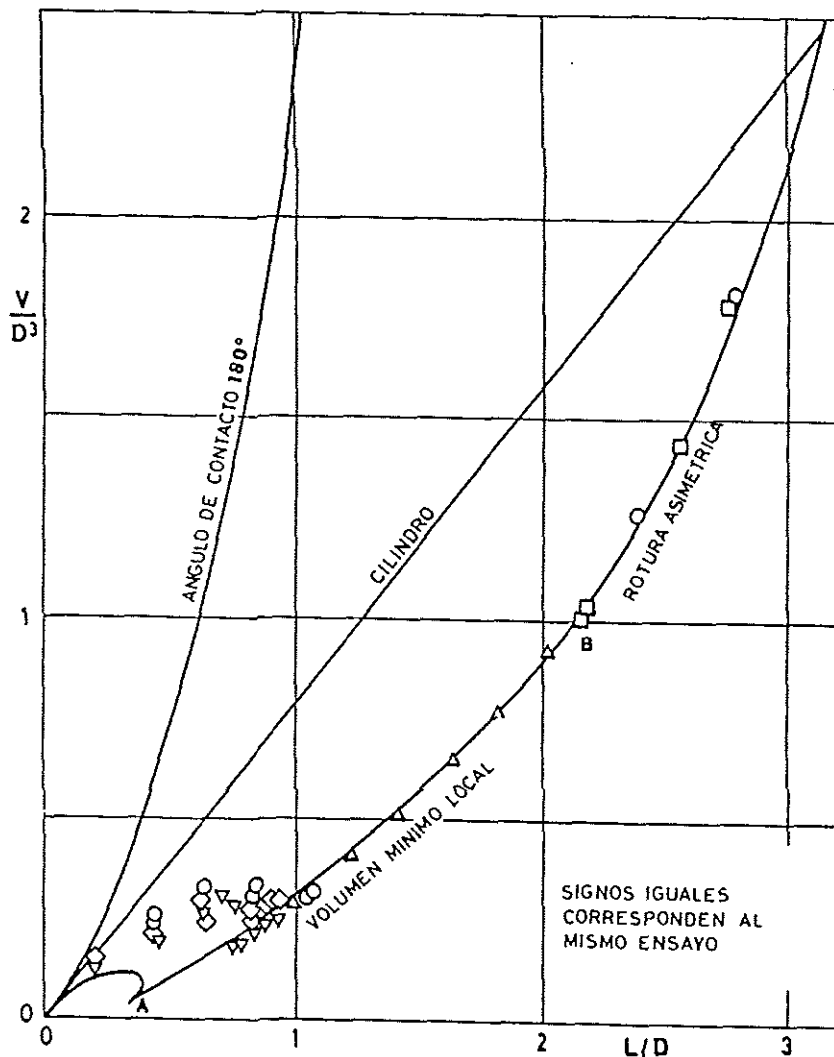


FIGURA 1

Límites superior e inferior del volumen estable, v , de un puente líquido en función de la esbeltez, L/D^3 . Los resultados experimentales han sido obtenidos mediante la simulación de Plateau; ver §4.

El proceso de purificación consiste en fundir al vacío un extremo de un cilindro del material impuro considerado, desplazando lentamente la zona fundida a lo largo del cilindro. Este se mantiene verticalmente, el material fundido está contenido por fuerzas de tensión superficial, y no hace falta utilizar un crisol que, de estar presente, reaccionaría con el material. La repurificación tiene lugar porque la fase fundida retiene las impurezas que terminan situándose en el extremo opuesto del cilindro. Además, se puede obtener un cilindro monocristalino iniciando la solidificación alrededor de un monocristal situado en uno de los extremos.

En condiciones de gravedad reducida, la zona fundida es mucho más larga que en tierra y esto puede ser ventajoso en algunos casos.

La preparación de futuros experimentos en los que la zona sería perturbada intencionada o accidentalmente, requiere un profundo conocimiento de sus límites de estabilidad. Aquí nos limitaremos a la estabilidad frente a perturbaciones mecánicas.

Tabla 1
Puentes Líquidos Largos
Lista de Contribuciones al Estudio
de Efectos Dinámicos

Configuración	Modelo Teórico	Resultados	Referencia
Básica (axilsimétrica, cilíndrica, discos iguales, gravedad nula).	Unidimensional, Rodajas (lineal y no lineal). Cosserat lineal.	Figs. 3 y 4	9
Básica (gravedad reducida axial).	Unidimensional, Rodajas (lineal).	Fig. 5	10
Básica (pero no cilíndrica).		Fig. 6	11
Básica (no cilíndrica y gravedad reducida axial).	Unidimensional, Rodajas. Pequeñas desviaciones a partir de las configuraciones críticas de equilibrio.		12
Básica (pero discos desiguales y gravedad reducida axial).	Unidimensional, Rodajas.	Eq. 2	13
Rotación sólida (gravedad reducida axial).	Bifurcación local	Fig. 7 Eq. 3	8

HIDROSTATICA DEL PUENTE LIQUIDO

Los estudios sobre la hidrostática de configuraciones contenidas por tensión superficial fueron iniciados en el siglo XIX por científicos tan renombrados como Young, Laplace, Gauss, Plateau, Rayleigh, etc.

Podríamos resumir los resultados más notables (para gravedad estrictamente nula y discos iguales) como sigue:

1.º La máxima longitud estable, L , de un puente líquido cilíndrico en reposo vale $L = \pi D$, siendo D el diámetro de los discos¹.

2.º La situación es muy distinta en otras configuraciones axilsimétricas. Por ejemplo, en el caso de un puente catenoidal (que es la configuración cuya superficie libre tiene curvatura media nula) $L/D = .47^2$.

3.º Los límites de estabilidad de un puente axilsimétrico han sido analizados en una serie de trabajos (ver p.e.³). Los resultados han sido comprobados parcialmente en tierra (mediante la simulación de Plateau, Fig. 1) y a bordo del Spacelab.

Un puente inicialmente cilíndrico puede evolucionar hacia los límites de estabilidad a través de diferentes caminos:

a) Succionando líquido o separando los discos extremos. Cuando el puente es muy corto se desprende de los bordes de los discos. Cuando la esbeltez, L/D , es menor que 2.13, aparece un cuello en la sección media del puente, y el cuello adelgaza hasta que el puente colapsa. Para mayores esbelteces el puente evoluciona hacia una configuración no simétrica que es inestable.

b) Aumentando el volumen del líquido contenido en el puente o disminuyendo la distancia entre los discos extremos hasta que el ángulo de contacto (disco-líquido-gas) alcanza un cierto valor, probablemente del orden de 180° . Algunos autores⁴ han encontrado un volumen máximo en sentido matemático que corresponde a valores del ángulo de contacto mayores que el mencionado. Este límite no se alcanza fácilmente en los experimentos.

La Fig. 2⁵ muestra los límites de estabilidad correspondientes a mínimo volumen para diferentes radios de los discos extremos.

4.^º) Uno de los objetivos de la demostración realizada a bordo del Skylab (TV101), en 1973, fue el estudio de los límites de estabilidad de un puente líquido cilíndrico girando en rotación sólida alrededor de su eje. Para una comparación de los resultados obtenidos con las predicciones analíticas pueden consultarse ^{6 7 8}.

HIDRODINAMICA DEL PUENTE LIQUIDO

Si los estudios sobre la hidrostática del puente líquido tienen ya cien años, la mayoría de los efectos dinámicos han sido descubiertos en los dos últimos años. Su estudio ha sido impulsado por los experimentos con el Módulo de Física de los Fluidos (FPM) realizados a bordo del Spacelab, 1.^a Misión. En la Tabla 1 se resumen las contribuciones más notables de mis colegas de Aeronáuticos. El objetivo de estos trabajos es estudiar la transición hacia la rotura y la configuración resultante.

La configuración básica es un puente axil-simétrico esbelto, mantenido entre dos discos paralelos iguales, en ausencia de fuerzas viscosas y gravitatorias.

El iniciador de los estudios teóricos fue J. Meseguer, quien aplicó a los puentes líquidos, bien un modelo unidimensional de "rodajas", que ya había sido usado en el estudio de la rotura de chorros capilares, o la teoría de Cosserat, que además de en chorros es muy usada en la Elasticidad de vigas sólidas. Ambos modelos proporcionan esencialmente los mismos resultados, aunque el modelo de Cosserat incluye efectos de inercia transversal y efectos viscosos integrados. Los resultados de un análisis lineal se expresan en función de un pequeño parámetro que mide la desviación inicial de la superficie libre respecto a la configuración cilíndrica. Los cálculos numéricos se basan en el modelo de rodajas no lineal.

En la Fig. 3 se presenta el factor de amplificación, γ , en función de la longitud de onda adimensional (o de la esbeltez), L/D , para chorros capilares (o puentes líquidos cilíndricos), de acuerdo con los distintos modelos. Se ve que las inestabilidades crecen más rápidamente (mayor

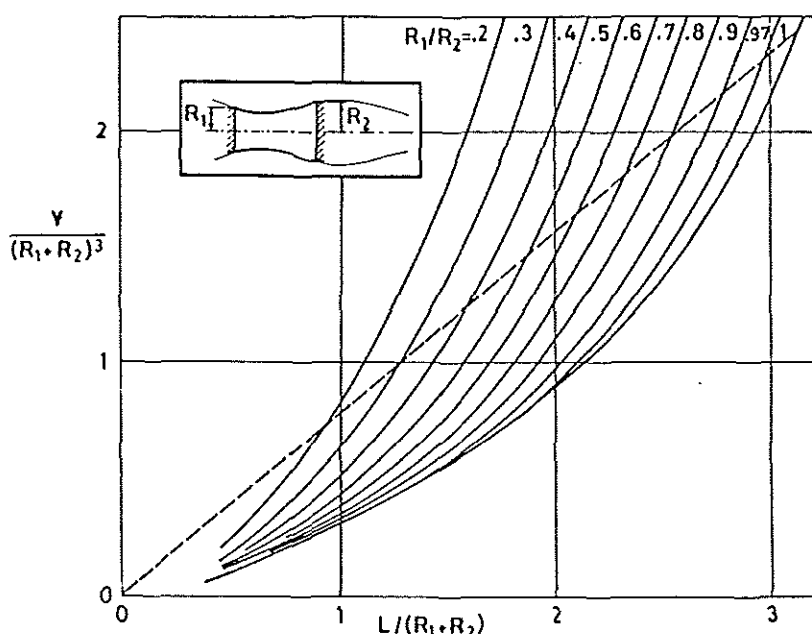


FIGURA 2

Límite inferior del volumen estable, v , de un puente líquido en función de la esbeltez, $L/(R_1+R_2)$, para diferentes relaciones R_1/R_2 de los diámetros de los discos⁵.

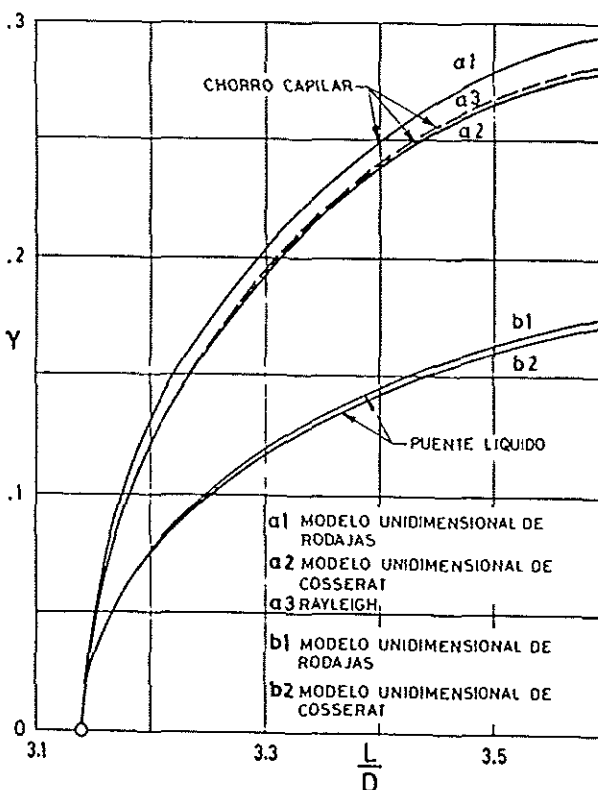


FIGURA 3

Factor de amplificación, γ , para chorros capilares y puentes líquidos en función de la esbeltez, L/D , según cálculos mediante diferentes modelos. En el caso de chorros capilares, L es la longitud de onda de la perturbación. La evolución temporal de la perturbación a partir de la configuración inicial de equilibrio es proporcional a $e^{(\gamma + i\omega)t}$. Por lo tanto, las perturbaciones inestables crecen tanto más rápidamente cuanto mayor sea γ ⁹.

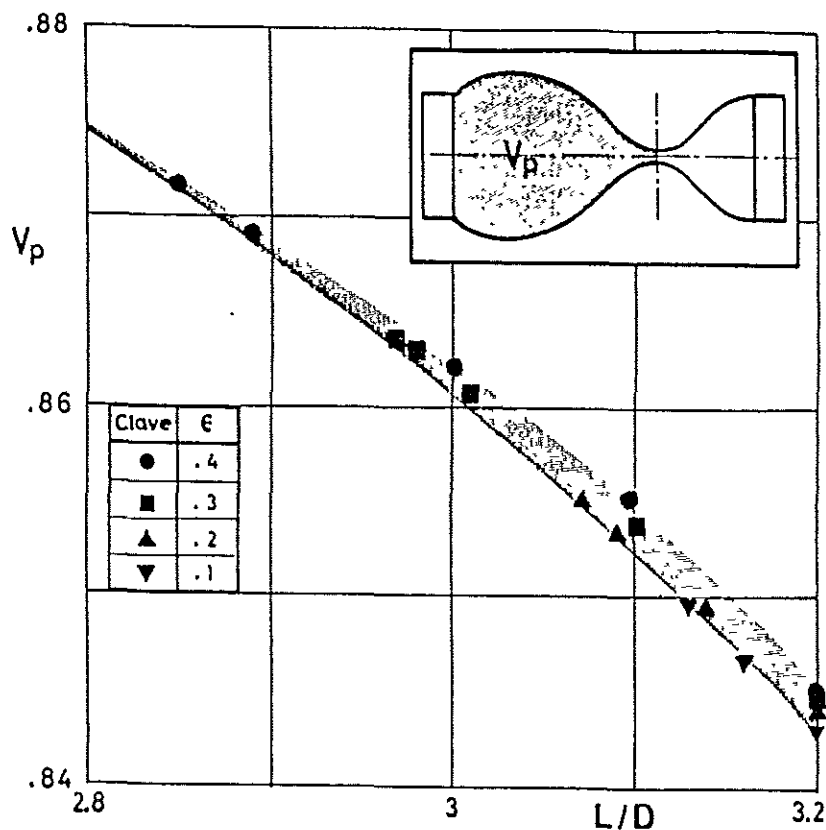


FIGURA 4

Volumen parcial después de la rotura, v_p , para puentes líquidos, inicialmente cilíndricos, en función de la esbeltez, L/D . Resultados obtenidos numéricamente para distintos valores del parámetro de perturbación, ϵ ⁸.

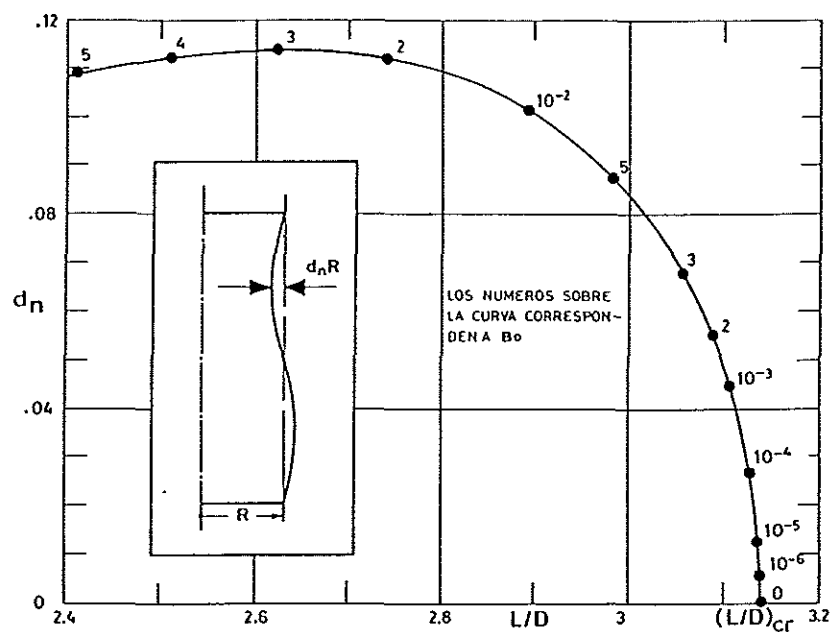


FIGURA 5.

Límites de deformación de un puente líquido, inicialmente cilíndrico, medidos mediante d_n , en función de la esbeltez, L/D , para valores pequeños de la gravedad axial. El número de Bond es $Bo = \rho g D^2 / 4 \sigma^{10}$.

γ) con los chorros que con los puentes líquidos, ya que estos últimos deben estar adheridos a los discos extremos.

La Fig. 4 muestra la fracción, v_p , del volumen inicial que permanece anclada a uno de los discos extremos, inmediatamente después de la rotura. Los resultados han sido obtenidos con el modelo de rodajas no lineal. Los símbolos sirven para identificar el valor de ϵ . Este tipo de información analítica se presta muy bien a la comprobación experimental.

La influencia de una gravedad axial pequeña ha sido analizada mediante el modelo lineal de rodajas en ¹⁰. La Fig. 5 muestra la deformación del puente para diferentes valores del número de Bond, Bo . Aquí el número de Bond es $Bo = \rho g (D/2)^2 / \sigma$; su significado físico será discutido en el apartado Simulación. Nótese la explosiva influencia de Bo cerca de cero. Esta es una peculiaridad que muchos experimentadores han pasado por alto.

La evolución de configuraciones inicialmente cilíndricas (por evolución entendemos: forma de la superficie libre, tiempo de rotura, volumen parcial de las gotas resultantes) ha sido analizada numéricamente en ¹¹. El pequeño parámetro ϵ mide aquí la amplitud de la desviación inicial sinusoidal del área de la sección recta del puente respecto al puente de la misma esbeltez y volumen estable mínimo. La Fig. 6 indica que el volumen parcial después de la rotura no depende de ϵ cuando L/D es suficientemente grande. He aquí otra razón por la que v_p se presta a medidas experimentales.

El análisis numérico de la evolución de configuraciones próximas a la rotura requiere un tiempo de cálculo muy grande. Por lo tanto, puede ser útil hacer un análisis no lineal basado en un método de "perturbaciones singulares". Esto ha sido hecho en ¹², donde también se tiene en cuenta el efecto de una gravedad axial pequeña.

Aunque inicialmente se pensó en usar dos discos iguales para el experimento en el FPM, al final resultó que los discos eran desiguales. Esto forzó a hacer un análisis de perturbaciones en función de dos pequeños parámetros, el número de Bond, Bo , y la diferencia en los diámetros de los discos, medida por la relación

$$H = \frac{D_T^2 - D_B^2}{D_T^2 + D_B^2} \quad (1)$$

(T , superior; B , inferior).

En ¹³ se muestra que el valor crítico de L/D está dado por

$$(L/D)_{cr} = \pi \{1 - (3/2)^{4/3} (Bo - H/2)^{2/3}\}. \quad (2)$$

Este resultado es sorprendente, porque claramente contradice las ideas establecidas sobre la utilidad del puente con pedestal (disco inferior mayor que el superior, $H < 0$). Para aumentar $(L/D)_{cr}$, el disco mayor debe ser colocado arriba. Parece que la explicación de esa paradoja está relacionada con la influencia del cuello del puente en la evolución hacia la rotura. El cuello aparece cerca del disco menor. Cuando este disco está colocado arriba, la gravedad (que actúa hacia abajo) tiende a afinar más el cuello, y al revés. Aunque estos resultados se basan en una teoría lineal, análisis numéricos no publicados todavía parecen indicar que existe la misma tendencia para valores no tan pequeños de Bo y H .

El caso de discos en iso-rotación ha sido considerado en⁸, donde se usa una teoría local de bifurcaciones que tiene en cuenta el efecto de una gravedad axial pequeña. Se han estudiado los dos modos fundamentales de deformación: el axilsimétrico y el modo "en comba" (modo C). La influencia de un número de Bond pequeño, no nulo, es radicalmente distinta en uno y otro caso. En el caso axilsimétrico, un valor pequeño de Bo distorsiona ligeramente la curva de estados de equilibrio, resultando inaccesible el punto de bifurcación, Fig. 7a. El límite de estabilidad es (el subíndice o indica condiciones para $Bo = 0$).

$$\frac{(L/D)_{cr} - (L/D)_o}{(L/D)_o} = F(We)Bo^{2/3} \pm \dots \quad (3)$$

donde $F(We)$ es una función bastante complicada del número de Weber de rotación, $We = \rho \Omega^2 R^3 / \sigma$.

En el caso no axilsimétrico (modo C) la curva de bifurcación meramente se traslada hacia valores menores del número de Weber crítico, Fig. 7b. La implicación física de estos resultados, a la hora de detectar las inestabilidades, no está muy clara y es probable que haga falta un análisis más completo del problema.

SIMULACION

Tradicionalmente se entiende por simulación la reproducción en tierra de los números de Bond estáticos que se alcanzarían en la plataforma espacial.

El número de Bond estático para una columna líquida rodeada por otro líquido es

$$Bo = \frac{\delta \rho g L}{\sigma} = \frac{RL}{L_b^2} \frac{\delta \rho}{\rho_1} \quad (4)$$

donde R y L son el menor radio de curvatura de la superficie libre y la longitud de la columna en dirección de la gravedad, respectivamente. $L_b = \sqrt{\sigma / \rho_1 g}$ es la llamada longitud de Bond, ρ_1 es la densidad del fluido más denso y $\delta \rho$ la diferencia de densidades. De acuerdo con la primera de las dos ecuaciones (4), el número de Bond estático es la relación entre las fuerzas de presión hidrostática y la tensión superficial.

A menudo, cuando lo que importa es poner de manifiesto efectos de escala en configuraciones geoméricamente semejantes, R y L son sustituidas por una sola longitud característica, $D/2$, como se hizo en las figuras 5 y 7.

Se consigue operar a números de Bond pequeños en gravedad normal reduciendo bien $\delta \rho$ o L .

La idea de suspender un volumen líquido dentro de otro líquido de la misma densidad, inmiscible con el anterior, se remonta al siglo pasado y se debe al físico belga Plateau, quien, por cierto, era ciego. Desde entonces la simulación de Plateau se ha usado para obtener resultados cualitativos de una gran belleza. Las dificultades surgieron cuando se intentó comparar esos resultados con las predicciones analíticas. Aunque las limitaciones de la simulación de Plateau han sido disculadas en²³, vamos a comentar las más importantes.

1) La reproducción del número de Bond estático se refiere sólo al equilibrio estático. Las fuerzas de inercia o las viscosas no aparecen en (4), que sólo define el nivel que alcanzan las fuerzas gravitatorias

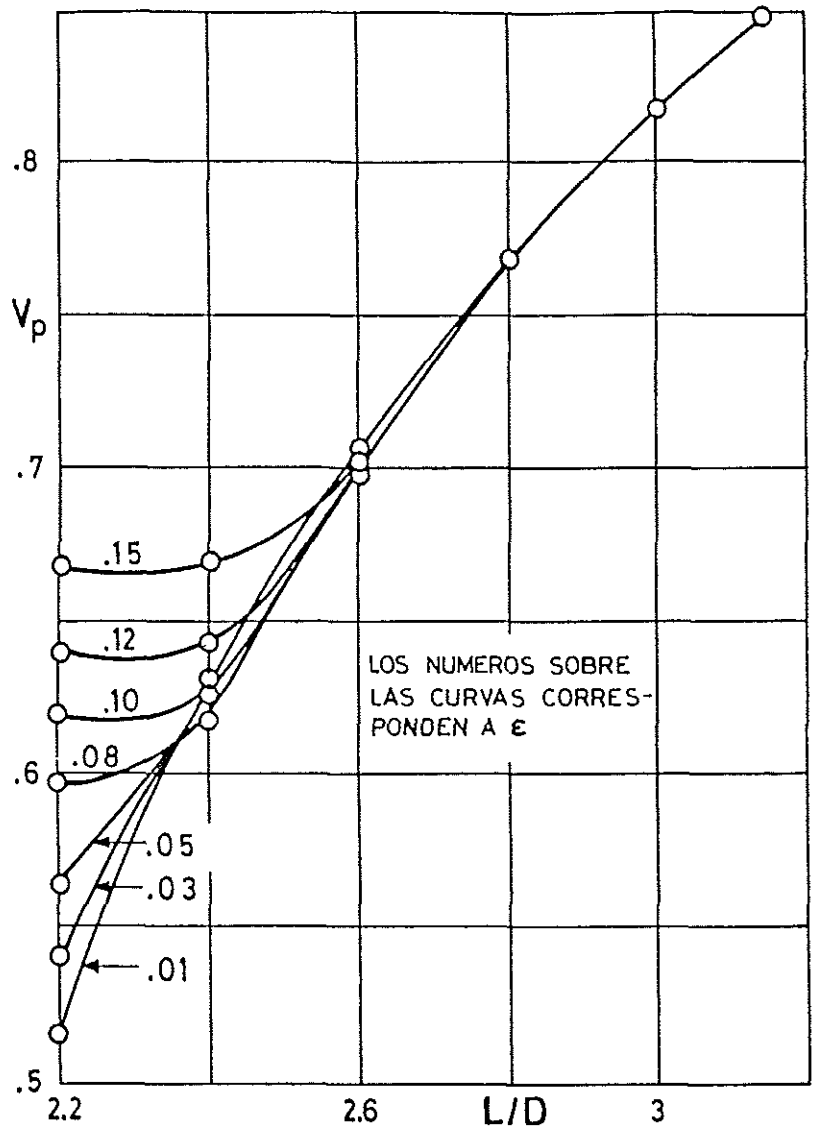
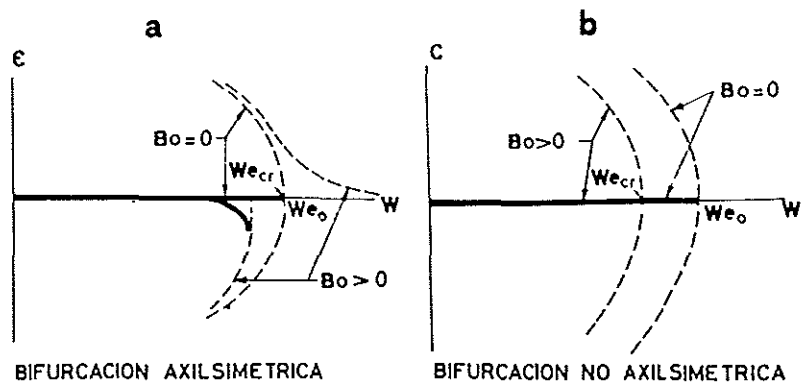


FIGURA 6

Volumen parcial después de la rotura, v_p , de puentes líquidos, inicialmente axilsimétricos, en función de la esbeltez, L/D . Aquí el parámetro ϵ mide la desviación inicial del área de la sección del puente líquido respecto a la configuración de mínimo volumen estable que tenga la misma esbeltez¹¹.



BIFURCACION AXILSIMETRICA

BIFURCACION NO AXILSIMETRICA

FIGURA 7

Estados de equilibrio para puentes líquidos, inicialmente cilíndricos, en rotación sólida y en presencia de una gravedad axial pequeña. a) Modo de deformación axilsimétrico. b) Modo de deformación no axilsimétrico⁹.

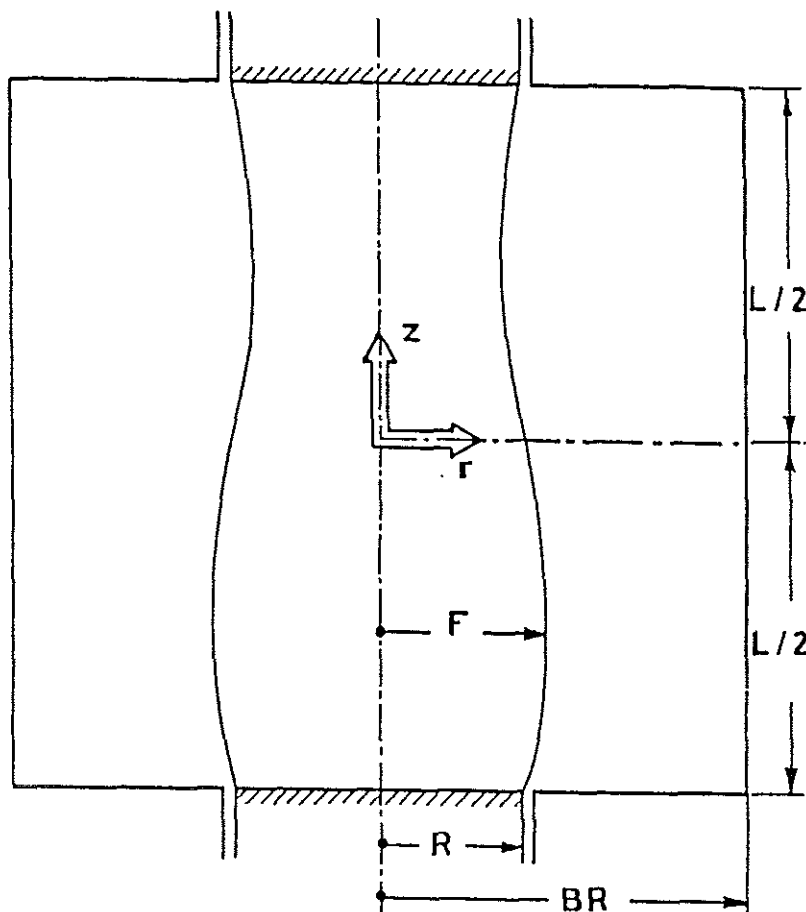


FIGURA 8
Geometría y nomenclatura para un puente líquido en el tanque de Plateau¹⁴.

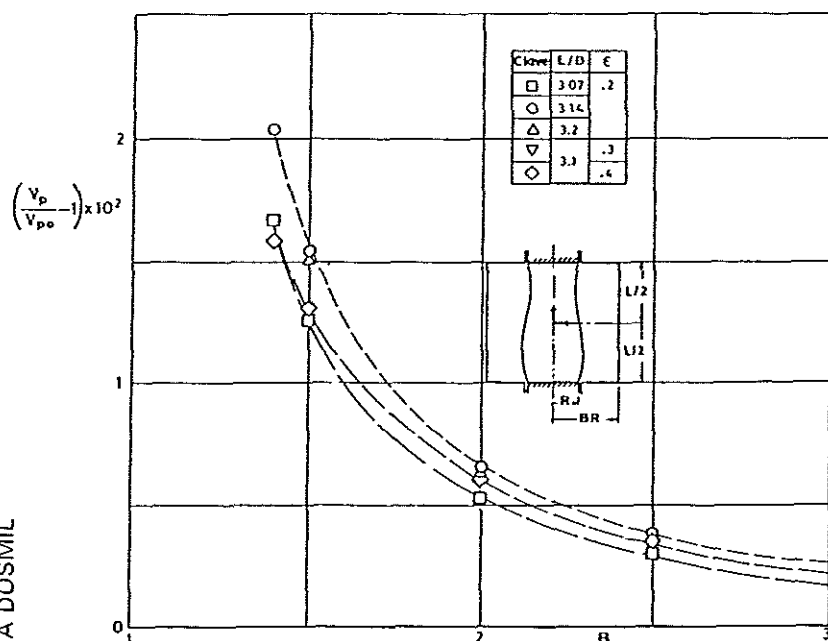


FIGURA 9

Relación de volúmenes parciales después de la rotura, v_p/v_{po} , en función de la anchura del baño, B, para diferentes valores de la esbeltez, L/D. v_p corresponde a la simulación de Plateau y v_{po} a gravedad nula. Los resultados han sido obtenidos numéricamente. La simulación de Plateau da resultados extremadamente precisos si B es suficientemente grande¹⁴.

medidas en términos de las otras fuerzas dominantes: las de tensión superficial.

Parámetros adimensionales basados en la relación entre otras fuerzas y las de tensión superficial adquieren importancia en problemas donde coexisten superficies libres con dichas fuerzas. Por ejemplo, el número de Weber o el parámetro capilar

$$We = \frac{\rho V^2 L/R}{\sigma/R}$$

$$Ca = \frac{\mu V/R}{\sigma/R}$$

son relaciones entre las fuerzas de inercia o las viscosas y las de tensión superficial, claramente no indican el nivel gravitatorio.

2) Para la mayoría de las parejas de líquidos de interés, cuando R y L son del orden de varios centímetros, RL/L^2 en (4) es el orden de 10^3 , por lo tanto, se necesita un control extremadamente preciso de la densidad del líquido de soporte ($\delta\rho \rightarrow 0$) para que el número de Bond resulte pequeño.

Muy recientemente uno de mis colegas, A. Sanz, se planteó el problema de perfilar los límites de validez de la simulación de Plateau en su Tesis Doctoral¹⁴.

La idea de partida era la siguiente: la simulación de Plateau suministra resultados incorrectos (incluso contrarios a la realidad⁵) cuando no se simulan apropiadamente las fuerzas viscosas, de inercia u otras. Encontrar parejas de líquidos de la misma densidad con la relación apropiada de viscosidades (o de conductividades térmicas) no parece fácil. Admitiendo que ciertos efectos son difíciles de simular, ¿cuál es su importancia en fenómenos de interés? Para contestar a estas preguntas, en particular en lo relativo a las fuerzas de inercia, Sanz analizó el comportamiento dinámico de una columna de líquido no viscoso en gravedad nula y en simulación de Plateau. La Fig. 8 muestra la configuración geométrica.

Para el análisis se utilizaron dos modelos diferentes: el de las rodajas, en sus versiones lineal y no lineal, y un modelo linealizado tridimensional en el que se desprecia el transporte convectivo de cantidad de movimiento comparado con la aceleración local. Los resultados más notables son los siguientes.

Fig. 9. Modelo de rodajas. La figura muestra la relación de volúmenes parciales v_p/v_{po} en función de la anchura del baño, B. v_p corresponde a la simulación de Plateau y v_{po} a gravedad nula. L/D es la esbeltez de la columna y ϵ la amplitud inicial de la deformación lateral.

La Fig. 10 indica que el efecto de B en la forma del puente es asombrosamente pequeño.

Fig. 11. Modelo lineal tridimensional. Se presenta la frecuencia de la oscilación, ω , en función de la esbeltez, L/D, para el primer y segundo modos. La línea continua corresponde a un baño de anchura infinita y la de trazos a B = 1.5.

Fig. 12. Relación de frecuencias de oscilación en función de la anchura, B, del baño. El subíndice cero corresponde a gravedad nula.

La conclusión fundamental es que la simulación de Plateau permite predecir con propiedad el comportamiento de un puente líquido de ingravidez, en lo referente al equilibrio estático, oscilaciones y rotura, cuando el número de Reynolds basado en la

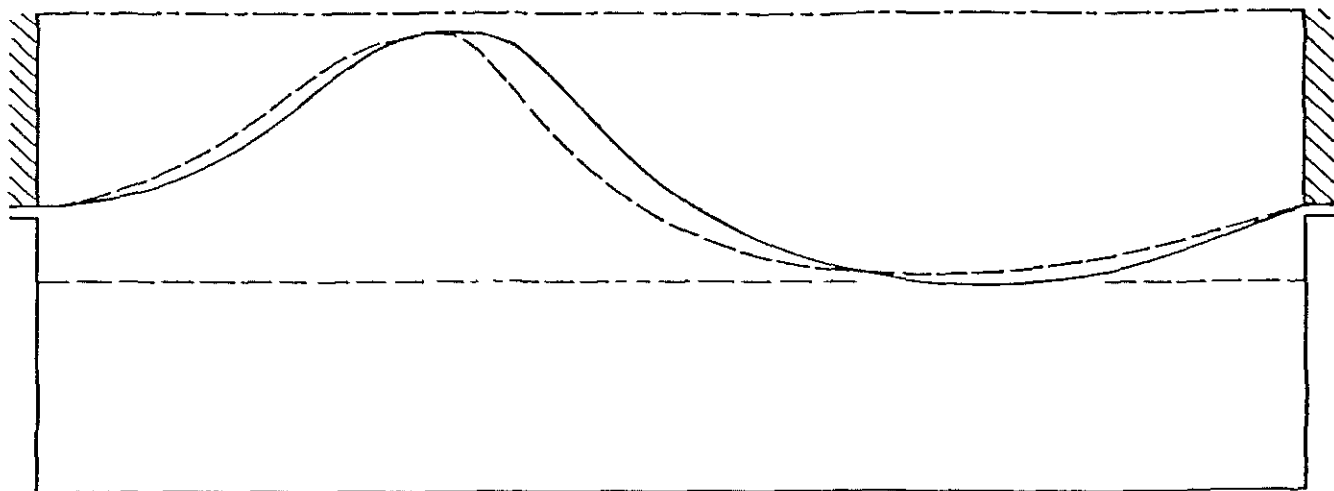


FIGURA 10

Forma del puente para dos anchuras del baño de Plateau. Las líneas continuas y punteadas, tanto para la pared del baño como para el contorno del puente, se corresponden¹⁴.

longitud de onda y en la frecuencia de la oscilación es suficientemente grande. El caso de que la viscosidad sea dominante es, probablemente, muy distinto.

Una vez obtenidos los resultados expuestos, se abren nuevos horizontes al experimentador. He aquí algunos de los estudios realizados.

La Fig. 13 muestra la instalación experimental usada por la simulación de Plateau.

La Fig. 13 presentaba resultados correspondientes a rotura de la columna succionando lentamente el líquido.

Fig. 14¹⁵. Rotura por separación lenta de los discos extremos.

Fig. 15¹⁴. Movimiento oscilante.

La simulación de Plateau no isoterma fue sugerida al autor por su amigo el Prof. Napolitano. Las dificultades experimentales son formidables pero confío en que algún candidato al doctorado recoja pronto el reto.

Cambios de fase, reacciones químicas y campos eléctricos son extensiones lógicas de la simulación de Plateau. El uso de ceras de bajo punto de fusión ha sido ya considerado. Los puentes catenoidales pueden servir para detectar efectos cinéticos en reacciones químicas muy lentas. La literatura existente sobre combinaciones de campos eléctricos y flotabilidad neutra es, cuando menos, venerable (ver 16-22).

Existe otra posibilidad de obtener números de Bond bajos, la llamada técnica de las zonas milimétricas en la L es pequeño.

Se han obtenido resultados muy interesantes con esta técnica, particularmente en lo relativo a convección inducida por gradientes de tensión superficial (ver²³, que contiene una lista bastante reciente de referencias). La experimentación no es fácil debido a los pequeños tamaños que hay que usar.

A mi modo de ver, la comparación de los experimentos con la teoría es descorazonadora. En primer lugar, al reducir el tamaño aumenta la importancia relativa de la viscosidad, por lo tanto, el número de Reynolds característico resulta estar en un régimen intermedio donde no valen las aproximaciones de alta ni de baja viscosidad. En segundo lugar, un

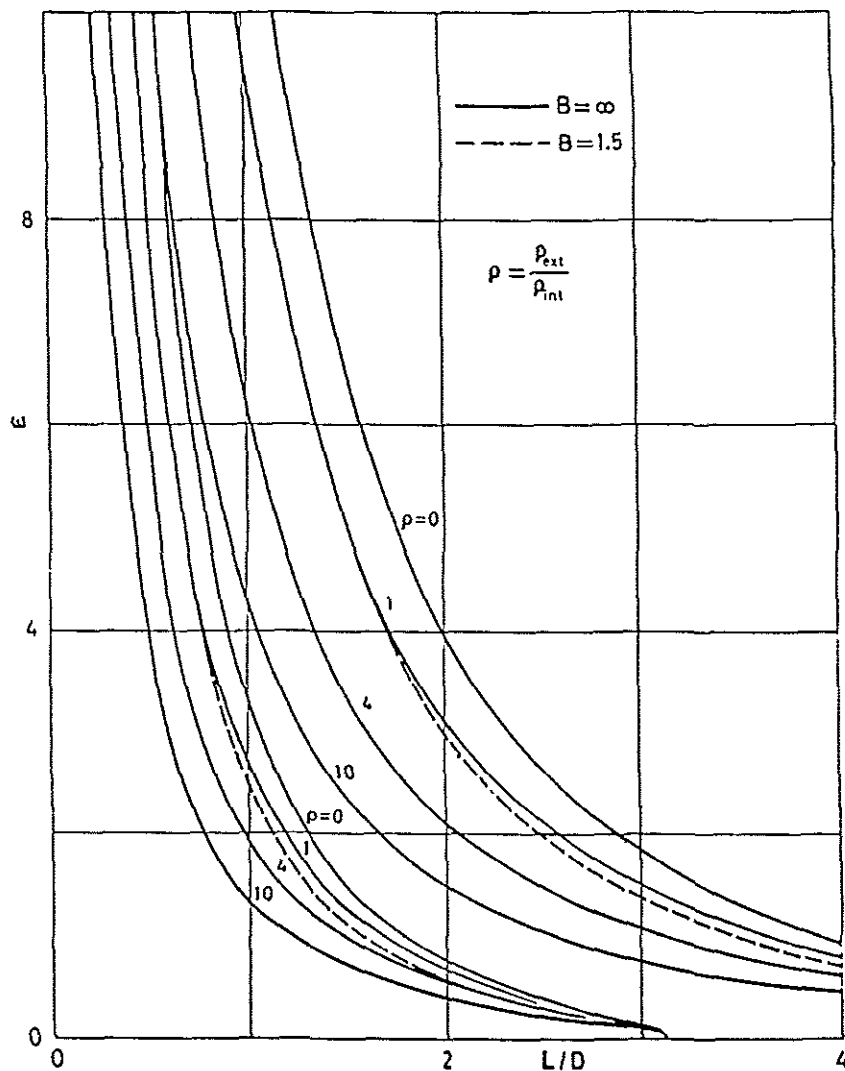


FIGURA 11

Frecuencia de la oscilación, ω , en función de la esbeltez, L/D . De nuevo la influencia de la pared es sorprendentemente pequeña. ρ es el cociente de la densidad del líquido de soporte (exterior) a la del líquido de la columna (interior)¹⁴.

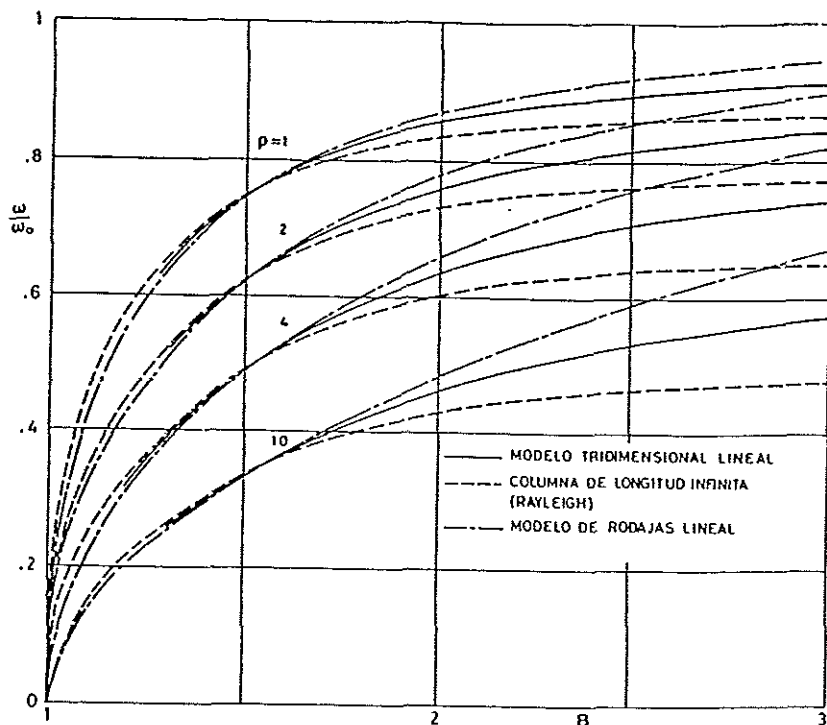


FIGURA 12

Relación de frecuencias, ω / ω_0 , en función de la anchura del baño, B. ω_0 corresponde a la simulación de Plateau y ω_0 a gravedad nula. Para que haya un buen acuerdo cuantitativo ($\omega / \omega_0 \sim 1$) el valor de B tiene que ser muy grande¹⁴.

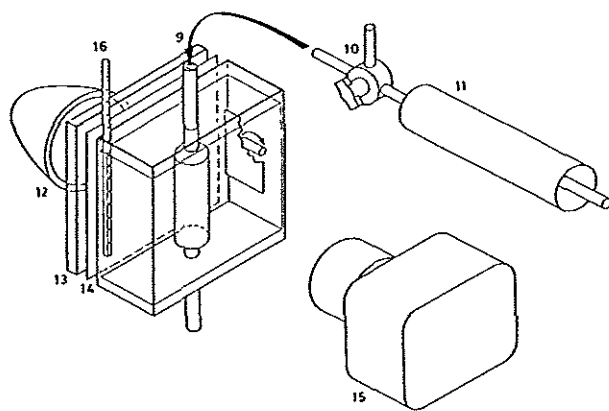


FIGURA 13

Montaje experimental para la simulación de puentes líquidos en condiciones de gravedad reducida mediante la técnica de Plateau. 9, Entrada del líquido del puente. 10, válvula en T. 11, Embolo. 12, Luz de fondo. 13, Filtro antitérmico. 14, Rejilla de fondo. 15, Cámara. 16, Termómetro¹⁴.

puente tan pequeño es muy sensible al ambiente que le rodea que, me parece, no ha sido hasta ahora controlado con suficiente cuidado.

Si una de las razones para realizar experimentos en el Espacio es la posibilidad de sostener por tensión superficial volúmenes de líquido mayores que en tierra, la técnica de la zona milimétrica es, curiosamente, un paso en la dirección contraria.

En un párrafo dedicado a la simulación de la gravedad reducida, no puede faltar la mención a aquellas configuraciones en las que la longitud L en la dirección de la gravedad alcanza límites submilli-

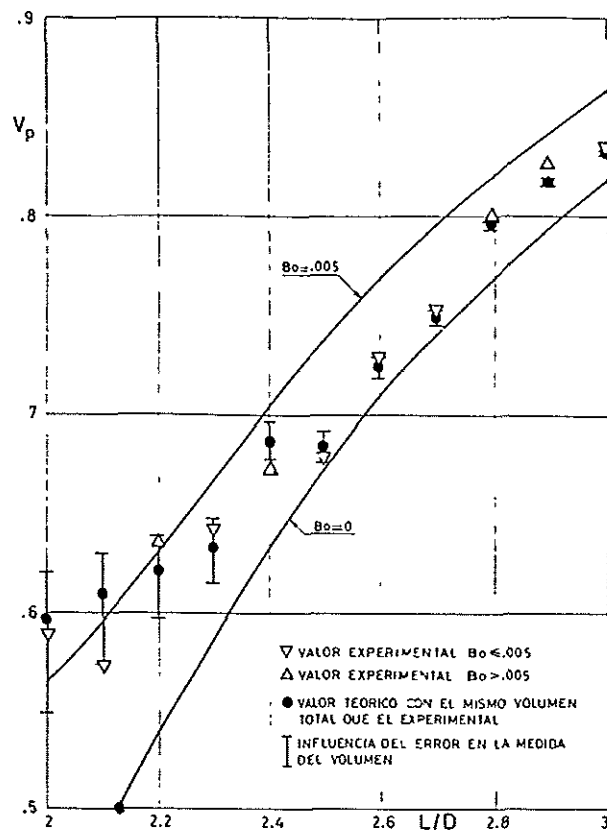


FIGURA 14

Volumen parcial después de la rotura, v_p , de puentes líquidos, inicialmente axilsimétricos, bajo la influencia de una gravedad axial pequeña, de acuerdo con la simulación de Plateau. La línea continua corresponde a resultados numéricos. Δ y ∇ son resultados experimentales en los que los valores de $Bo = \delta \rho g D^2 / 4 \sigma$ están basados en los de $\delta \rho$ medidos inmediatamente antes de la rotura. \bullet resultados obtenidos numéricamente con los mismos volumen total y Bo que los experimentales. Como ha ocurrido otras veces, la dispersión es mayor cuanto menor sea la esbeltez, L/D ¹⁵.

métricos. Esto pasa, por ejemplo, en ciertas técnicas de microfabricación en las que, siendo la presión hidrostática absolutamente despreciable, las fuerzas de van der Waals pueden llegar a ser dominantes.

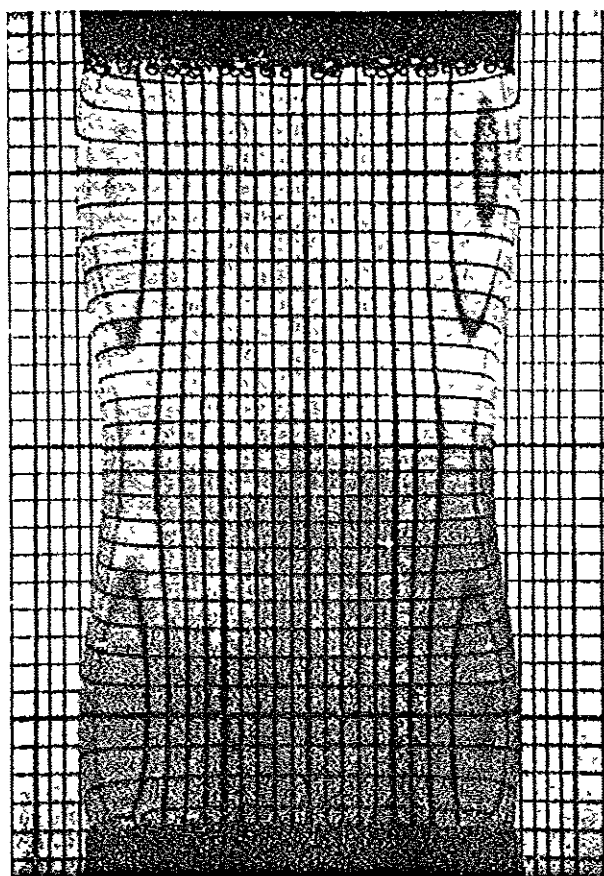
APLICACIONES COMERCIALES

La realización de experimentos en plataformas orbitales no es fácil. Las muchas limitaciones y dificultades se discuten en²⁴.

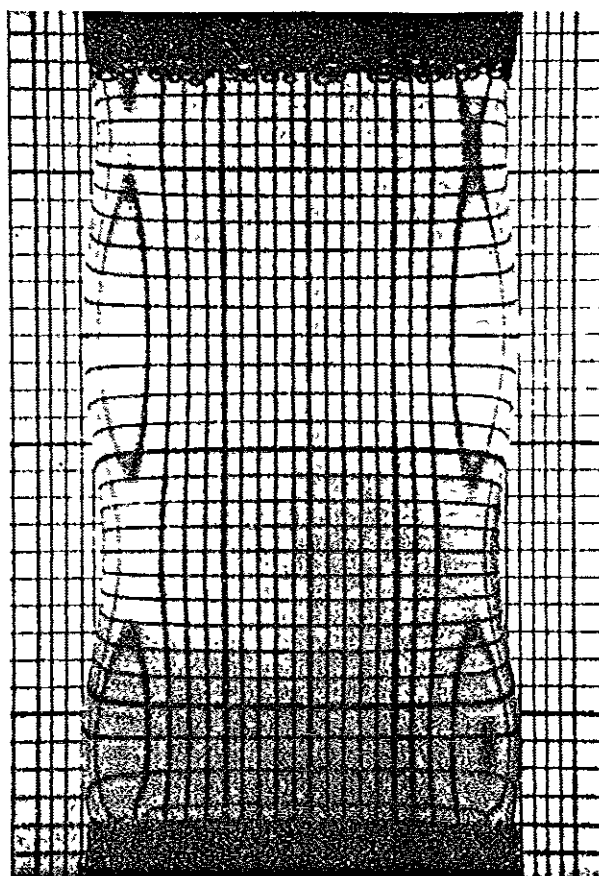
Opino que en este momento el inconveniente más serio de estos experimentos es el tiempo que pasa entre las distintas oportunidades de vuelo. La situación pudiera cambiar en un futuro próximo, pero las perspectivas de comercialización de la manufactura espacial no son muy favorables, por la razón mencionada. Los procesos que se están desarrollando en los laboratorios terrestres se mueven mucho más rápidamente hacia la comercialización. Esto limita los presentes esfuerzos al dominio, de ningún modo insignificante, de la exploración científica.

Dos casos muy recientes pueden servir para ilustrar esta afirmación.

El primero se refiere a los procesos de fusión y



0.75



1.29

FIGURA 15

Puentes líquidos suspendidos entre discos oscilantes. Se indican los valores de las frecuencias de oscilación en Hz¹⁴.

repurificación mediante la zona flotante. Tratemos de resumir el estado de conocimiento en 1973 (el Skylab IV fue lanzado el 16 de noviembre de 1973).

1) En condiciones de gravedad reducida casi desaparece la convección libre. Esto es verdad en lo referente a la convección inducida por flotabilidad, pero los gradientes de tensión superficial pueden inducir convección, tanto más fuerte cuanto mayores son las superficies libres, anulando parcialmente una de las ventajas de la gravedad reducida: la posibilidad de producir y estabilizar grandes superficies libres no planas.

2) En el espacio se pueden obtener por fusión zonas flotantes mayores que en tierra, si se dispone de la potencia eléctrica necesaria, pero ¿para qué valen esas zonas tan grandes?

2.4) Las ventajas que puedan presentar las zonas flotantes grandes cuando se trata de repurificar materiales en los que las impurezas se distribuyen uniformemente no están muy claras. La solidificación periférica de aleaciones polifásicas es, en cambio, un asunto diferente. Puede ser que aparezcan dendritas muy largas cuando la composición del cristal es muy diferente de la fase líquida. La longitud que debe tener la zona es tan grande que puede no ser estable.

2.2.) Es posible fundir cilindros de gran sección en condiciones de gravedad reducida porque las tem-

peraturas de fusión pueden llegar al núcleo central antes de que las capas exteriores empiecen a fluir por efecto de la gravedad. Sería posible, por tanto, cortando en rodajas el cilindro una vez solidificado, obtener cristales mucho mayores que los producidos con otros procesos existentes. Esto sería, sin duda, una ventaja, pero la utilidad comercial del proceso es, en este momento, bastante dudosa. Existen procesos, como el de enfriado rápido²⁵ que permiten obtener bandas de silicio de 50 mm. de anchura a una velocidad de 10 a 20 m.s.⁻¹. En²⁶ se presentan diversos métodos para producir bandas y placas de silicio. Alguno de estos métodos están ya en la fase de producción en planta piloto. En la citada referencia se comparan los diferentes procesos en términos de velocidad de crecimiento, tamaño, continuidad del crecimiento y rendimiento de las células solares resultantes. Ninguno de los procesos supera claramente a los otros en función de las variables mencionadas. En cualquier caso, la reacción de moldes y rodillos con el silicio produce contaminación (y degradación) del silicio y grave deterioro del aparato.

Aunque el tema de la electroforesis está un poco apartado del resto del artículo, es interesante introducirlo como un segundo ejemplo en apoyo de la afirmación de que los procesos espaciales, si no se agiliza la logística de los lanzamientos, difícilmente

pueden competir con desarrollos paralelos en tierra.

La electroforesis es una técnica de separación basada en la propulsión de partículas cargadas, sumergidas en un fluido, por efecto de un campo eléctrico. La gravitación terrestre produce sedimentación y, a través del efecto Joule generado por el paso de la corriente eléctrica, corrientes de convección. Estas corrientes producen un mezclado que es perjudicial para el proceso de separación. Los inconvenientes se superan en tierra confinando el fluido portador (buffer) en membranas muy finas (stabilizers) lo que limita la técnica a pequeñas cantidades y a ensayos que requieren mucha mano de obra.

La ventaja fundamental de la electroforesis sobre otras técnicas de separación reside en que permite una separación basada en criterios funcionales. Las transformaciones de las células dan lugar a alteraciones de su carga eléctrica superficial y, por tanto, de su movilidad electroforética.

En²⁷ se puede encontrar una revisión del estado actual de las técnicas de separación, juntamente con referencias adicionales.

Los primeros intentos de demostrar las ventajas de la electroforesis en el espacio fueron realizados a bordo del Apollo 14, Enero 1971²⁸. En ^{28 31} se presentan los resultados obtenidos a bordo del Apollo-Soyuz, Julio 1975. La electroforesis en puente líquido fue propuesta por Watt³². Desgraciadamente, los primeros intentos³³ fueron interrumpidos pronto.

Desde el punto de vista de nuestra discusión conviene concentrarse en los dos puntos siguientes: resolución que se puede alcanzar y producción continua automática.

Me parece que los procesos de electroforesis en el espacio no pueden competir en términos de resolución con las técnicas que existen en tierra, cuya resolución mejora en paralelo con un conocimiento y control más perfectos de la formación de las membranas estabilizadoras.

Sin embargo, en lo tocante a la automatización, hay que decir que, aunque la electroforesis en sus múltiples versiones, es la técnica más comúnmente usada para separar y caracterizar proteínas, las versiones verdaderamente automáticas no han llegado al nivel de uso rutinario, debido a su complicación.

Yo no creo que, salvo contadas excepciones, las técnicas existentes sean apropiadas para su aplicación directa en las plataformas espaciales, porque requieren una gran dedicación por parte de la tripulación. Pero, por otra parte, la ausencia de los efectos de convección libre, característica de la gravedad reducida, puede ser crucial en el proceso de "electroforesis continua", idea largamente acariciada, en el que se realiza la separación mientras el fluido portador fluye a través de un conducto desprovisto de estabilizador y cuya sección recta es de varios centímetros cuadrados. En³⁴ se discuten diversos procedimientos para reducir el efecto de la convección, tanto en tierra como en órbita. En tierra el proceso parece menos prometedor (aunque el número de variables sobre el que se puede jugar sea mayor, porque el gradiente de temperaturas debido al efecto Joule puede ser paralelo, antiparalelo o normal a la acción de la gravedad).

Para una intensidad dada del campo eléctrico, la resolución depende del tiempo de residencia de las

partículas (una longitud característica, la del electrodo, dividida por una velocidad característica).

Mi punto de vista particular, en relación con la electroforesis en el espacio puede resumirse así:

1) La electroforesis continua en el espacio pudiera alcanzar resoluciones comparables a las obtenidas en este momento en tierra, pero con tiempos de residencia mucho menores.

2) Para la misma resolución, el rendimiento de la electroforesis continua en el Espacio pudiera ser un orden de magnitud mayor que el obtenido en equipos comparables en tierra.

3) La investigación que requiera gran resolución se seguirá haciendo en tierra.

4) La operación en el espacio plantea nuevos problemas, como una transmisión de calor desde el medio líquido mucho menos eficaz y problemas logísticos relacionados con el almacenamiento en la base de lanzamiento, lanzamiento mismo, experimentación en órbita y recuperación.

CONCLUSIONES

Aunque este trabajo presenta una visión sólo parcial del amplio y creciente campo de proceso de los materiales en el espacio, las siguientes conclusiones se fundan en experiencias recientes de mis colegas y mías propias.

1) La aplicación comercial de la manufactura espacial, el marchamo "made in space", está lejos.

2) La ciencia aplicada a los procesos en el espacio está aún en su infancia, aunque en el momento presente sea un área del máximo interés científico.

3) Tanto el tiempo entre misiones como el coste de la misión deben ser reducidos enormemente si se intenta competir con el laboratorio terrestre, accesible cotidianamente.

4) El trabajo en tierra de evaluación y selección de los experimentos, preparación de la misión y análisis de los resultados debe aumentar mucho en comparación con el nivel de esfuerzo presente.

Me atrevería a decir que los próximos avances serán hechos en tierra durante la preparación de los experimentos y no durante la realización de éstos en el espacio.

5) El llamado "spin-off", que en este caso significa la aplicación en tierra de los descubrimientos espaciales, ha sido importante en muchas áreas en la técnica aeroespacial y lo será, sin duda, en ésta.

6) No hay que desdeñar el efecto catalizador de la investigación espacial en muchas actividades científicas. El proceso de materiales en el espacio abre nuevos campos de investigación tanto en fluidodinámica como en física del estado sólido.

AGRADECIMIENTO

La Comisión Española de Investigación del Espacio (CONIE) ha subvencionado el trabajo del grupo del Laboratorio de Aerodinámica de la ETSI Aero-náuticos durante los últimos diez años.

REFERENCIAS

- 1 Sturt, J.J. (Baron Rayleigh), *The Theory of Sound*, Vol 2, Chap 20, pp 351-355, Dover, New York, 1945
- 2 Erie, M.A., Gillette, R.D. & Dyson, D.C., 'Stability of Interfaces of Revolution with Constant Surface Tension: The Case of the Catenoid', *Chem Eng J*, Vol 1, pp 97-109, 1970
- 3 Sanz, A. & Martínez, I., 'Minimum Volume for a Liquid Bridge between Equal Disks', *J Colloid Interf Sci*, Vol 93, pp 235-240, 1983
- 4 Gillette, R.D. & Dyson, D.C., 'Stability of Fluid Interfaces of Revolution between Equal Solid Circular Plates', *Chem Eng J*, Vol 2, pp 44-54, 1971
- 5 Martínez, I., 'Stability of Axisymmetric Liquid Bridges', ESA SP-191, pp 267-273, París, 1983
- 6 Martínez, I., 'Floating Zone - Equilibrium Shapes and Stability Criteria', *Cospar Space Research*, Vol XVIII, pp 519-522, Pergamon Oxford, 1978
- 7 Da Riva, I., 'Stability of Liquid Bridges', *Applications of Space Developments*, pp 69-80, Pergamon, Oxford, 1981
- 8 Vega, J.M. & Perales, J.M., 'Almost Cylindrical Isorotating Liquid Bridges for Small Bond Numbers', ESA SP-191, pp 247-252, París, 1983
- 9 Meseguer, J., 'The Breaking of Axisymmetric Slender Liquid Bridges', *J Fluid Mech*, Vol 130, pp 123-151, 1983
- 10 Meseguer, J., 'The Influence of Axial Microgravity on the Breakage of Axisymmetric Slender Liquid Bridges', *Journal Crystal Growth*, Vol 62, pp 577-586, 1983
- 11 Meseguer, J., Sanz, A. & Rivas, D., 'The Breaking of Axisymmetric Non Cylindrical Liquid Bridges', ESA SP-191, pp 261-265, París, 1983
- 12 Rivas, D. & Meseguer, J., 'One-Dimensional Self-Similar Solution of the Dynamics of Axisymmetric Slender Liquid Bridges', *J Fluid Mech*, Vol 138, pp 417-429, 1984
- 13 Meseguer, J., 'Stability of Slender, Axisymmetric Liquid Bridges between Unequal Disks', *Journal of Crystal Growth*, *Aparecerá próximamente*
- 14 Sanz, Andrés, A., 'Comportamiento de las Zonas Líquidas Flotantes en Microgravedad Simulada', Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1983
- 15 Meseguer, J. & Sanz, A., 'Numerical and Experimental Study of the Dynamics of Axisymmetric Liquid Bridges', *J Fluid Mech*, *Aparecerá próximamente*
- 16 Taylor, G.I., 'Disintegration of Water Drops in an Electric Field', *The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor*, Vol IV, pp 451-466, Cambridge, 1971
- 17 Taylor, G.I., 'The Stability of a Horizontal Fluid Interface in a Vertical Electric Field', *The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor*, Vol IV, pp 467-481, Cambridge, 1971
- 18 Taylor, G.I., 'Conical Free Surfaces and Fluid Interfaces', *The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor*, Vol IV, pp 482-485, Cambridge, 1971
- 19 Taylor, G.I., 'The Circulation Produced in a Drop by an Electric Field', *The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor*, Vol IV, pp 501-509, Cambridge, 1971
- 20 Taylor, G.I., 'Instability of Jets, Threads and Sheets of Viscous Fluid', *The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor*, Vol IV, pp 543-546, Cambridge, 1971
- 21 Allan, R.S. & Mason, S.G., 'Particle Behaviour in Shear and Electric Fields. I, Deformation and Burst of Fluid Drops', *Proc Roy. Soc.*, Vol A 267, pp 45-61, 1962
- 22 Melcher, J.R. & Taylor, G.I., 'Electrohydrodynamics: A Review of the Role of Interfacial Shear Stresses', *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol 1, pp 111-146, Annual Reviews Inc., Palo Alto, 1969
- 23 Da Riva, I. & Napolitano, L.G., 'Fluid Physics under Reduced Gravity-An Overview', ESA SP-191, pp 5-12, París, 1983
- 24 Malmejac, Y., Bewersdorff, A., Da Riva, I. & Napolitano, L.G., 'Challenges & Perspectives of Microgravity Research in Space', ESA BR-05, pp 66-69, París, 1981
- 25 Arai, K.I., Tsuya, N. & Takuchi, T., 'Ultra High Speed Growth of Silicon Ribbons for Solar Cells', 14 IEEE Photovoltaic Spec Conf., pp 31-35, 1983
- 26 Hu, C. & White, R.M., 'Solar Cells', McGraw Hill, Chap 9, pp 179-196, New York, 1983
- 27 Maugh, T.H., 'A Survey of Separative Techniques', *Science*, Vol 222, pp 259-266, 1983
- 28 Snyder, R.S., 'Summary of the pre-ASTIP Results', ESA SP-114, pp 19-26, París, 1976
- 29 Hanning, K. & Schindler, R., 'Review of Electrophoresis Experiments on ASTIP', ESA SP-114, pp 27-31, París, 1976
- 30 Hanning, K. & Wirth, J., 'Detailed Results of ASTIP Experiment MA-014 (Continuous Flow Electrophoresis)', ESA SP-114, pp 135-140, París, 1976
- 31 Seaman, G.V.F., Allen, R.E., Barlow, G.H. & Bier, M., 'Detailed Results of ASTIP Experiment MA-011', ESA SP 114, pp 155-166, París, 1976
- 32 Watt, J.G., 'Isoelectric Focussing and Forced Flow Electrophoresis', ESA SP-101, pp 279-282, París, 1974
- 33 Lewis, G., Foster, P.R. & White, B., 'Preliminary Study of a General Purpose Floating-Zone Electrophoresis Facility for Spacelab', ESA SP-114, pp 167-174, París, 1976
- 34 Ostrach, S., 'The Influence of Convection in Continuous - Flow Electrophoresis', ESA SP-114, pp 141-147, París, 1976